

INVESTIGAÇÃO OPERACIONAL EM AÇÃO

CASOS DE APLICAÇÃO

RUI CARVALHO OLIVEIRA
JOSÉ SOEIRO FERREIRA
(EDITORES)

IMPRESA DA UNIVERSIDADE DE COIMBRA
COIMBRA UNIVERSITY PRESS

CASO 11

PROJETO DE UMA REDE LOGÍSTICA PARA A RECOLHA DE EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS E ELETRÓNICOS

Maria Isabel Gomes

CMA – FCT - Universidade Nova de Lisboa
mirg@fct.unl.pt

Ana Paula Barbosa Póvoa

CEG – IST, Instituto Superior Técnico
Universidade de Lisboa
apovoa@tecnico.ulisboa.pt

RESUMO

A Amb3E tem por missão a definição e gestão de um sistema integrado de recolha, tratamento e valorização dos resíduos de equipamentos elétricos e eletrónicos. A rede de recolha para estes equipamentos encontra-se em funcionamento desde 2006 sem, no entanto, ter havido qualquer estudo científico relativamente à estrutura da rede e ao seu planeamento ao nível tático. Foi pois estudada não só a definição da rede de custo total mínimo, como também da avaliação do impacto ambiental da mesma e a determinação da estrutura ótima de acordo com este segundo objetivo. O estudo efetuado tem por base um modelo linear inteiro misto especialmente desenvolvido para o efeito. Este modelo é um modelo de localização de instalações, multi-período e multi-produto. Numa primeira fase foram definidas as redes ótimas segundo cada um dos objetivos: económico e ambiental. Numa segunda fase, efetuou-se uma análise multi-objetivo recorrendo ao método das restrições. Dadas as dimensões do problema, esta última análise foi efetuada apenas para a região de Lisboa e Vale do Tejo.

PALAVRAS-CHAVE

Logística inversa, Localização de instalações, Multi-objectivo, Equipamentos eléctricos e eletrónicos

1. Introdução

O rápido crescimento da produção de resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos (REEE) transformou a sua deposição num problema transnacional. A presença de elevadas quantidades de substâncias tóxicas nestes produtos tem causado, nos últimos anos, graves problemas ambientais. Sendo os objetivos da política ambiental da União Europeia a

“preservação, proteção e melhoria da qualidade do ambiente, a proteção da saúde das pessoas e a utilização prudente e racional dos recursos naturais”

foi publicada em 2003, a diretiva 2002/96/CE que impõe aos países membros a criação de estruturas que permitam uma “recolha separada” dos REEE e o seu posterior tratamento e valorização dentro de parâmetros estabelecidos a nível da União Europeia, de modo a reduzir a deposição destes produtos em aterros sanitários. Todos os países deveriam transpor esta diretiva para os respetivos quadros jurídicos até ao final do ano de 2004. Na transposição para a lei portuguesa, o dia 31 de Dezembro de 2006 foi estabelecido como prazo para que fosse atingido um conjunto de metas quantitativas, garantindo o cumprimento da diretiva europeia.

Neste sentido, um conjunto de produtores de equipamentos elétricos e eletrônicos (EEE) associou-se criando a Amb3E – Associação Portuguesa de Gestão de Resíduos. Esta associação tem por missão a definição e gestão de um sistema integrado de recolha, tratamento e valorização dos REEE. No processo de definição da rede de recolha destes equipamentos surgiram diversas questões das quais se destacam: Onde localizar os centros de receção? Quantos centros abrir em cada localização? Qual deve ser a capacidade de processamento de cada centro de modo a garantir o cumprimento das metas legais? Quais os tipos de transporte que devem ser subcontratados?

Aquando da realização deste trabalho, a rede de recolha da Amb3E já se encontrava em operação. No entanto, não tinha havido qualquer estudo sistematizado relativo à estrutura da rede e ao seu planeamento a nível tático. Era pois do interesse da associação a definição da rede de custo total mínimo considerando-se entre outros os custos de transporte, de armazenamento e de

processamento. Por outro lado, um dos pontos que deu origem à diretiva europeia prendia-se com questões ambientais. Assim, considerou-se uma avaliação dos impactos ambientais da rede onde foram integrados diversos impactos, entre os quais os causados pela abertura das instalações, pelo transporte e pelo processamento.

Para efetuar o estudo descrito desenvolveu-se um modelo linear inteiro misto (MILP) com as características de um modelo de localização de instalações, multi-período e multi-produto. Neste a rede de recolha modelada é formada por três níveis: as fontes geradoras de resíduos, os centros de recepção (CR) e as unidades de tratamento e valorização (UTV). Consideraram-se todos os 278 municípios de Portugal continental como potenciais localizações dos centros de recepção assim como fontes geradoras de resíduos. Dado que a associação pretendia estabelecer protocolos com as unidades de tratamento e valorização, foram consideradas neste estudo as oito unidades a operar em Portugal.

Numa primeira fase foi definida a rede de custo mínimo e comparada a estrutura de custos obtida com a realmente verificada pela Amb3E. Uma análise semelhante foi efetuada tendo por base a minimização de impactos ambientais. Com recurso ao método das restrições, efetuou-se também uma análise multi-objetivo considerando-se os objetivos económico e ambiental. Dadas as dimensões do problema, esta última análise foi efetuada apenas para a região de Lisboa e Vale do Tejo. Os resultados obtidos fornecem informações importantes ao decisor para a avaliação da rede atual quando comparada com a rede ótima quer em termos de custos, quer em termos de impactos ambientais, permitindo ainda analisar os níveis de recolha conseguidos.

2. Características da rede de recolha de REEE da Amb3E

A Amb3E é uma das entidades responsáveis pela gestão do sistema de recuperação de REEE em Portugal. Esta associação sem fins lucrativos tem por missão gerir eficientemente um sistema integrado de gestão de resíduos de equipamentos elétricos e eletrónicos. O problema em estudo surge na sequência do enorme crescimento da sua estrutura logística, nomeadamente,

do aumento do número de centros de recepção e de unidades de tratamento e valorização. Este crescimento foi motivado não só pelo aumento do consumo de EEE e, conseqüente geração de resíduos, mas também pela crescente consciencialização dos cidadãos para a problemática dos REEE. É assim necessário repensar a estrutura da rede estabelecida e planear adequadamente a rede de recolha dos REEE para a Amb3E considerando não só a questão económica mas também a questão do impacto ambiental deste sistema.

2.1 A situação atual

No final do ano de 2008, a Amb3E contava com 640 produtores aderentes (Figura 1) que colocaram no mercado, nesse mesmo ano, cerca de 30 000 unidades de EEE perfazendo um total de 116 000 t (Figura 2).

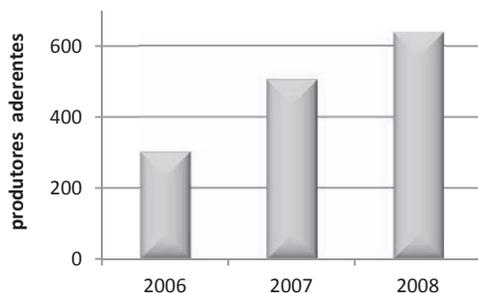


Figura 1: Número de produtores aderentes à Amb3E (Amb3E, 2009)

De acordo com o n° 10 do artigo 9° do Decreto-lei n° 230/2004, a meta legal para a recolha seletiva de REEE foi estabelecida em, pelo menos, 4 kg/(habitante*ano). Em 2008, a Amb3E assegurou a recolha de cerca de 32 990 t, correspondendo a apenas 3.11 kg/habitante. No entanto, apesar de à primeira vista não ter sido atingida a meta, a licença da Amb3E prevê um mecanismo de ajustamento da meta de recolha em função da quota de mercado real da associação, isto é, da quota de mercado detida pelos produtores associados. Considerando a meta e a população nacionais, o quantitativo nacional de recolha é cerca de 42 470 t de REEE provenientes de particulares. Sendo a quota de mercado dos produtores aderentes à Amb3E, em peso de EEE colocados no mercado, de cerca de 70%, a Amb3E tinha

como objetivo de recolha, para esse ano, aproximadamente 29 650 t, o que correspondia a 2.8 kg/habitante. Pelo que a meta foi plenamente atingida.

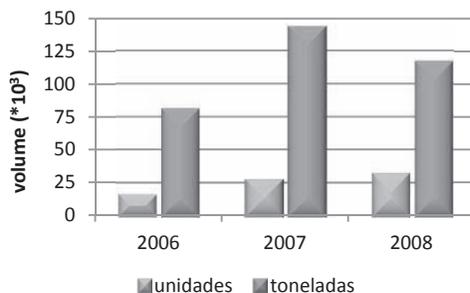


Figura 2: Volume de EEE colocados no mercado (Amb3E, 2009)

Em termos de quantidade recolhida podemos ver na Figura 3 que esta tem aumentado significativamente nos três primeiros anos de operação, tendo-se observado um crescimento de 61% de 2007 para 2008.

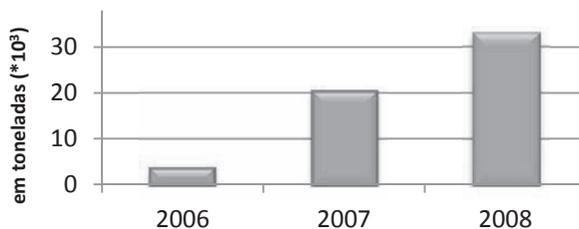


Figura 3: Quantidade recolhida pela Amb3E (Amb3E, 2009)

2.2 Categorização dos produtos

A diretiva europeia WEEE (2002/96/EC), bem como a legislação nacional, separam os equipamentos elétricos e eletrónicos em 10 categorias legais: (1) Grandes eletrodomésticos, (2) Pequenos eletrodomésticos, (3) Equipamentos informáticos e de telecomunicações, (4) Equipamentos de consumo, (5) Equipamentos de iluminação, (6) Ferramentas elétricas e eletrónicas, (7) Brinquedos e equipamentos de desporto e lazer, (8) Aparelhos médicos, (9) Instrumentos de monitorização e controlo e (10) Distribuidores automáticos. Contudo, por uma questão de operacionalidade e maior facilidade no controlo

dos resíduos tratados, a Amb3E reformulou as 10 categorias legais em cinco fluxos operacionais (de acordo com o apresentado na Tabela 1). Em termos de distribuição percentual, vemos que o fluxo A (grandes equipamentos) representa 35.52% do total de toneladas recolhidas, seguindo-se o fluxo B (equipamentos de frio). Com um volume de recolha menor estão os equipamentos de iluminação (fluxo E) que representam apenas 1.45% do peso total recolhido.

Tabela 1: Fluxos operacionais da Amb3E (Amb3E, 2009)

Fluxos operacionais	Categorias legais	Distribuição percentual
A – Grandes equipamentos	1	35.52
B – Equipamentos de refrigeração e congelação contendo CFC	1, 8, 10	25.90
C – Pequenos equipamentos	2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10	23.37
D – Aparelhos de televisão e monitores de tubos de raios catódicos (CRT)	3,4	13.76
E – Equipamentos de iluminação	5	1.45

2.3 A rede logística da recolha

A rede logística da Amb3E é formada por três elementos principais: os locais de recepção, os operadores logísticos e as unidades de tratamento e valorização. Estas entidades são responsáveis pelas três atividades principais da rede: recepção, recolha e triagem, e tratamento e valorização (Figura 4).

No final de 2008, a rede de locais de recepção cobria todo o território nacional contabilizando 315 locais, tendo-se registado um crescimento de 3.2 vezes relativamente ao ano anterior. Dependendo do papel que desempenham na rede, os locais de recepção podem ser: centros de recepção, locais de recolha e pontos eletrão.

Os centros de recepção são as entidades centrais desta rede logística. Apesar de serem externos à Amb3E contratam com esta um conjunto de

atividades por contrapartida financeira. Nomeadamente, é sua obrigação receber gratuitamente os REEE de proveniência particular e não-particular, separá-los nos cinco fluxos operacionais e armazená-los até que possam ser transportados para uma unidade de tratamento e valorização. É a atividade de triagem feita nestes centros que os torna fundamentais para a Amb3E e para o problema em estudo.

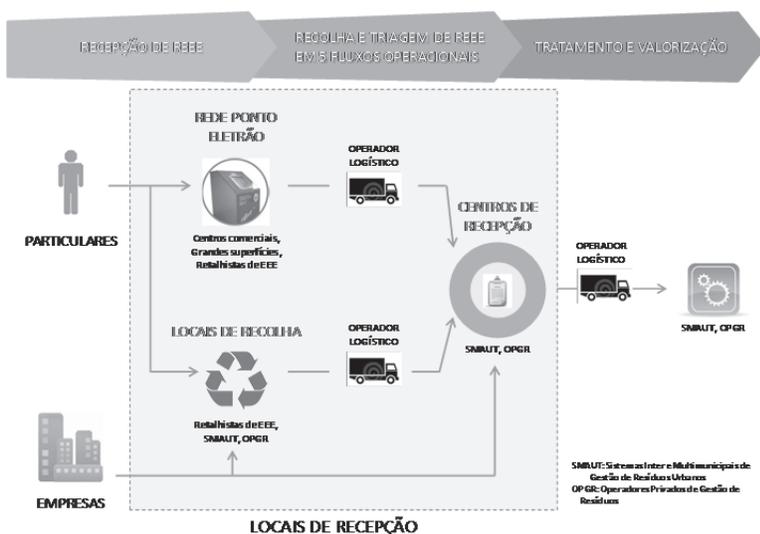


Figura 4: Rede de recolha da Amb3E (baseado em Amb3E, 2009)

Os locais de recolha são instalações onde se pode entregar gratuitamente REEE para que sejam armazenados e, posteriormente, expedidos. Estes locais funcionam de forma complementar aos centros de recepção, pelo que não efetuam a operação de triagem. Estas instalações são constituídas por serviços municipais e intermunicipais de gestão de resíduos urbanos, grandes produtores de REEE ou, mais recentemente, entidades mais próximas da população, como associações humanitárias de bombeiros voluntários.

Finalmente, os pontos eletrão são, muito provavelmente, a face mais visível do trabalho desenvolvido pela Amb3E. Estes são pequenos contentores que podem ser encontrados em centros comerciais, bombas de gasolina, ou outras grandes superfícies e que se destinam a receber REEE até média dimensão.

Disponíveis desde o final de 2007, tiveram como grande objetivo aproximar os consumidores da iniciativa, consciencializá-los para a problemática dos REEE e promover uma maior recolha deste tipo de resíduos.

Adicionalmente, a Amb3E disponibiliza um sistema de recolhas especiais aos seus associados, utentes e operadores com importância estratégica. Tal como o nome do serviço indica, a Amb3E recolhe os REEE junto dos seus produtores/detentores, assegurando o encaminhamento adequado para as unidades de tratamento e valorização. Além de ser um serviço de elevada mais-valia para os seus aderentes, estas recolhas especiais permitem à Amb3E aceder a quantidades adicionais de resíduos de forma integrada e otimizada com o restante processo.

Todos os REEE que chegam aos locais de recepção da Amb3E têm de ser transportados até às unidades de tratamento e valorização por operadores logísticos. A rede nacional de operadores logísticos efetua o transporte dos REEE para os destinos definidos pela Amb3E num regime de *outsourcing*, assegurando assim o eficiente e adequado tratamento dos resíduos e a sua valorização.

O tratamento dos REEE de todas as categorias legais e a totalidade das quantidades recebidas neste sistema integrado é feito através da rede de unidades de tratamento e valorização. Esta desenvolve práticas eficientes de tratamento dos REEE nos cinco fluxos operacionais definidos, o que permite recuperar o valor material e energético contido nos resíduos, assegurando a sua reciclagem e valorização. Os fluxos operacionais em que são processados os REEE englobam todos os equipamentos das 10 categorias legais anteriormente descritas.

Tendo iniciado as operações com duas UTVs, a Amb3E aumentou em 2008 a sua rede para 12 unidades de modo a assegurar o tratamento adequado de todos os REEE geridos no âmbito do sistema. Destas 12 unidades, apenas oito têm atividade em Portugal continental, pelo que serão estas as consideradas neste trabalho. Apesar do elevado número de lâmpadas recolhido, o seu peso diminuto torna este fluxo num fluxo de difícil tratamento logístico, tanto em questões de armazenamento como de tratamento. Devido a estas características, o tratamento deste resíduo é efectuado apenas por uma UTV

que se lhe dedica em exclusividade. As restantes sete unidades processam os outros quatro fluxos.

Neste contexto e dado que até à data de realização deste trabalho a Amb3E não tinha ainda efetuado nenhum estudo sistematizado sobre a estrutura da sua rede logística, definiram-se os seguintes objetivos para este trabalho: (1) determinar as localizações ótimas para os centros de recepção (2) propor um planeamento tático de apoio à gestão dos fluxos que integram a rede e (3) proceder à avaliação dos impactos ambientais da rede. Dada a existência de dois tipos de métricas para a definição da rede (económica e ambiental) considerou-se ainda uma abordagem multi-objetivo da solução “ótima” para este problema.

3. Contexto teórico e modelo adotado

De há cerca de 20 anos a esta data têm sido publicados alguns estudos relacionados com a recolha de equipamentos elétricos e eletrónicos. Anteriormente à diretiva europeia, diversos produtores de EEE tinham-se já debruçado sobre esta questão tendo desenvolvido sistemas de recolha para os seus produtos em fim-de-vida. Muitos destes trabalhos foram efetuados em parceria com a academia. Um bom exemplo desta parceria é o trabalho publicado por Flapper et al. (2005) onde são apresentados (numa perspetiva de gestão) diversos estudos de caso relacionados com EEE em fim-de-vida.

Nesta revisão da literatura focaremos a nossa análise em trabalhos que, de alguma forma, se relacionam com a otimização do projeto de redes de recolha de equipamentos elétricos e eletrónicos. Sugerimos a consulta de Rogers et al. (2012) e Sheriff et al. (2012) onde se apresentam revisões da literatura sobre as questões da modelação em logística inversa, área na qual se insere o projeto de redes de recolha.

Do conhecimento dos autores deste trabalho, um dos primeiros artigos publicados relacionado com o desenho de redes de equipamentos elétricos e eletrónicos foi o trabalho de autoria de Krikke et al. (1999). Neste artigo os autores otimizam a rede de refabrico de um tipo de máquina produzida por uma empresa de máquinas copiadoras. Os autores propõem um modelo MILP onde as decisões principais se colocam ao nível da localização das fábricas e

do fluxo de produtos. O modelo baseia-se num modelo de localização e afetação onde se consideram também decisões ao nível do processo de refabrico a instalar em cada fábrica. O problema foi resolvido com recurso ao *solver* LINDO.

Walther e Spengler (2005) desenvolveram um modelo linear que permite determinar as frações de REEE que devem ser desmontadas, enviadas para reciclagem ou para deposição final, com o objetivo de maximizar o lucro marginal anual. Relativamente ao método de resolução, os autores apenas referem que recorreram a um “algoritmo baseado em programação linear”. Sharma et al. (2007) recorrem a uma formulação MILP para determinar quais as empresas com quem efetuar contratos de *leasing* assim como quanto tempo estes contratos deverão ser mantidos. Este modelo foi aplicado a um conjunto diverso de equipamentos eletrónicos de uma empresa sediada na Alemanha, tendo sido resolvido recorrendo ao *solver* Xpress-MP. Lieckens e Vandaele (2007) propõem uma formulação não linear onde integram decisões relativas à localização das instalações com decisões de inventário. A não linearidade provém da modelação dos tempos de aprovisionamento efetuada por um modelo de filas de espera G/G/1. As soluções do problema são obtidas com recurso a um algoritmo de *differential evolution*. Grunow e Gobbi (2009) desenvolvem um modelo para a afetação dos centros de recolha às diversas empresas de recolha em operação na Dinamarca. Esta formulação é posteriormente estendida com base em modelos de cobertura de modo a minimizar o número de empresas de recolha a operar num determinado município. Como método de resolução os autores recorrem ao *solver* CPLEX.

Recentemente, Alumur et al. (2012) propuseram uma formulação MILP para o projeto de redes de recolha. O modelo contempla produtos e tipos de instalações diferentes, num contexto multi-período. A formulação baseia-se nos modelos de localização de instalações multi-período onde as capacidades das instalações são definidas por módulos. Isto é, aquando da abertura da instalação, uma determinada capacidade (de entre um número limitado de opções) tem que ser escolhida, podendo apenas ser expandida em unidades de tempo posteriores. Este modelo foi resolvido recorrendo ao *solver* CPLEX.

Relativamente ao estudo de sistemas nacionais de recolha de REEE considerando todas as categorias mencionadas na diretiva europeia, os trabalhos publicados são escassos. Podemos, no entanto, referir o trabalho de Chang et al. (2006) onde se desenvolve um modelo linear inteiro misto para o projeto de uma rede de recolha na China cuja resolução é efetuada recorrendo ao solver LINGO. Queiruga et al. (2008) estudam a localização de recicladores de EEE em Espanha. Devido principalmente a questões relacionadas com a independência administrativa das regiões espanholas, os autores não puderam otimizar o projeto da rede de recolha a nível nacional. Contudo, após a seleção de um conjunto de potenciais localizações para a instalação de recicladores, estas foram caracterizadas de acordo com diferentes critérios, tendo-se recorrido à metodologia PROMETHEE para selecionar as melhores alternativas.

O trabalho aqui descrito prossegue e complementa o trabalho anteriormente realizado pelos autores (Gomes et al., 2011) onde se abordou este tema pela primeira vez. O modelo adaptado (ver secção 3.2) é baseado no modelo publicado neste trabalho pelo que aqui será apresentado apenas de forma resumida. Para uma descrição mais pormenorizada do mesmo aconselhamos a leitura do trabalho mencionado.

3.1 Sustentabilidade

A bibliografia sobre a sustentabilidade da cadeia de abastecimento tem vindo a crescer nos últimos anos encontrando-se dispersa por diversas áreas. Turkay et al. (2004) exploram o problema de uma cadeia de abastecimento colaborativa entre várias empresas em que não se consideram apenas objetivos económicos, mas são também incorporados alguns aspetos ambientais. Matos e Hall (2007) analisam a integração dos conceitos de desenvolvimento sustentável na cadeia de abastecimento e propõem uma estrutura que deve guiar a utilização de métodos de análise do ciclo de vida na cadeia de abastecimento. Duque et al. (2009), baseando-se na metodologia Eco-Indicator 99, quantificam os impactos ambientais de uma cadeia de recuperação de resíduos de produtos industriais. Quariguasi Frota Neto et al. (2009) propõem uma heurística de duas fases para tratar problemas multi-

objetivo. No exemplo apresentado são minimizados objetivos de custos, procura acumulada de energia e geração de resíduos numa rede de recolha. Recentemente Kannan et al. (2012) desenvolvem um modelo de localização de instalações para o projeto de redes de recolha. Um dos aspetos mais interessantes deste trabalho prende-se com a quantificação da pegada ecológica no projeto de uma rede de recolha. Os autores incluem este termo na função objetivo (custo total da rede) como o custo associado aos créditos de emissão de CO₂. O modelo desenvolvido foi resolvido com recurso ao *solver* LINGO 8.

Apesar dos trabalhos aqui mencionados, a extensão das cadeias de abastecimento ao desenvolvimento sustentável é ainda um assunto pouco explorado (Nikolopoulou e Ierapetrinou, 2012). A construção de modelos em que se consideram tanto os custos como os impactos ambientais é ainda escassa.

Neste trabalho, a sustentabilidade da cadeia de abastecimento será modelada segundo a metodologia Eco-Indicator 99, proposta por PRÉ Consultants (2008). Este indicador de soma ponderada tem por objetivo refletir o impacto ambiental de produtos ou processos através da quantificação dos efeitos nocivos para o ambiente de todas as atividades que se relacionam com os produtos ou processos em análise. O método baseia-se na análise do ciclo de vida, sendo o valor final (o indicador) calculado em três etapas. A primeira prende-se com a inventariação das atividades envolvidas, reunindo-se informação relativa aos recursos usados, à utilização da superfície terrestre (*land-use*) e às emissões produzidas. Numa segunda fase reúne-se toda a informação anterior e calcula-se o “efeito” que o produto/processo tem nos recursos, *land-use* e no ecossistema. Por último, calcula-se o indicador final, determinando-se os pesos a usar na soma ponderada dos três termos anteriormente calculados.

3.2 O modelo matemático

O problema em estudo é um problema de localização de instalações num contexto multi-produto e multi-período. Com uma formulação linear inteira mista, este modelo contempla diversas questões diretamente relacionadas com

a gestão de um sistema logístico. Começaremos por definir as variáveis utilizadas assim como a forma como se modelou o tempo. Depois apresentaremos as duas funções objetivo e finalizaremos com uma descrição das restrições consideradas.

Como mencionado anteriormente, a rede da Amb3E é uma rede de três níveis onde se pretende avaliar a localização dos centros de recepção que formam o segundo nível da rede (Figura 5). Entre cada nível, define-se um fluxo: F_1 modela o fluxo entre os locais de recolha e os centros de recepção, enquanto F_2 modela os fluxos entre estes últimos e as unidades de tratamento e valorização. Como referido aquando da descrição da rede logística da Amb3E, F_1 corresponde ao fluxo de equipamentos indiferenciados, sendo esta diferenciação efetuada apenas nos centros de recepção. Consequentemente, o fluxo F_2 representa o conjunto dos 5 fluxos distintos previamente caracterizados, cada um associado com cada uma das categorias definidas pela associação. A estes dois fluxos acresce ainda o fluxo que modela o tratamento/reciclagem dos equipamentos (F_p) e o fluxo dos equipamentos que, por diversas razões (contaminação, económica, entre outras), não podem ser reciclados sendo enviados para aterro (F_d). A modelação destes fluxos é feita com recurso a uma variável contínua X_{mijt} que representa a quantidade de produto m , enviado pela entidade i para a entidade j , no período (t, v) .



Figura 5: Representação esquemática da rede logística de recuperação de REEE

O tempo é modelado através da definição de uma escala dupla (Figura 6). Esta envolve uma unidade macro (t) onde a recolha dos equipamentos disponíveis nos locais de recolha deverá ser satisfeita e uma unidade micro (v) que permite um maior detalhe no planeamento desta recolha. De forma genérica, esta opção de modelação permite aproximar o modelo às diferentes

escalas temporais de tomada de decisão num contexto de gestão: decisões de natureza operacional (de curto prazo), tática (de médio prazo) e estratégica (de longo prazo). Sendo os modelos de localização tradicionalmente modelos de decisão estratégica, o recurso a uma dupla escala de tempo permite considerar também decisões de nível tático (ou mesmo operacional). Com este tipo de escalas é possível associar decisões anuais com mensais, ou mensais com diárias, ou qualquer outra combinação que melhor se ajuste ao problema em análise.

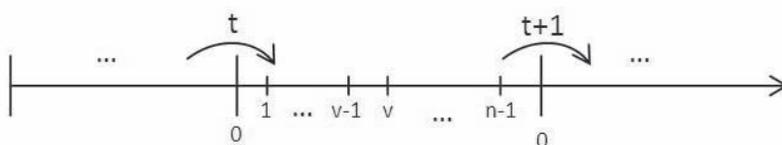


Figura 6: Dupla escala de tempo: relação entre a unidade macro (t) e a unidade micro (v)

A decisão relativa à localização dos centros de receção é feita recorrendo à variável binária Y_i que toma o valor 1 quando a localização i é escolhida para a abertura de um centro de receção. Estas decisões não dependem das unidades de tempo adotadas, pelo que uma determinada instalação permanecerá aberta (ou fechada) durante todo o horizonte temporal. O modelo contempla ainda decisões relativas às quantidades armazenadas nas entidades, modeladas pela variável S_{mitv} (quantidade do produto m , armazenado na entidade i , na unidade de tempo (t,v)).

Finalmente, uma outra característica que diferencia este modelo dos de localização tradicionais é o facto de se permitir que a quantidade disponível nos locais de recolha não seja totalmente transportada para os centros de receção. Pretende-se, desta forma, avaliar qual a quantidade de produto que é economicamente viável para ser recolhida. Para tal definiu-se a variável U_{mit} que representa a quantidade de produto m que não foi recolhida na entidade i na unidade de tempo t . Esta variável está definida apenas para a maior unidade de tempo. Note-se que apesar de estarmos a lidar com equipamentos, o que faria supor a modelação com variáveis inteiras, a Amb3E não considera

o número de equipamentos mas sim o seu peso, pelo que, excetuando a variável binária, nenhuma das outras é inteira.

A função objetivo económica é modelada pela equação [1]. O primeiro termo refere-se ao custo fixo de abertura dos centros de recepção, o segundo termo diz respeito aos custos diretamente relacionados com os fluxos anteriormente definidos, o que inclui os custos de reciclagem e de envio dos equipamentos não recicláveis para aterro. O terceiro termo é referente à taxa de compensação que é paga a cada centro de recepção por cada tonelada de REEE enviado para uma UTV. O quarto termo diz respeito aos custos de armazenamento que são contabilizados nos centros de recepção e nas unidades de tratamento e valorização. Finalmente, o último termo introduz na função objetivo uma penalização caso não seja recolhida a totalidade dos equipamentos disponíveis nos locais de recolha.

$$\begin{aligned} \text{Min } F_c = & \sum_i f_i Y_i + \sum_{mijtv} c_{mijtv} X_{mijtv} + \sum_{mijtv} c_i^c X_{mijtv} \\ & + \sum_{mitv} c_{mitv}^s S_{mitv} + \sum_{mit} c_{mit}^u U_{mit} \end{aligned} \quad [1]$$

A função objetivo que modela os impactos ambientais [2] é definida por quatro parcelas. O primeiro termo refere-se aos impactos relativos dos fluxos, ou seja, impactos do transporte entre as três entidades existentes, impactos dos processos de reciclagem e os impactos da eliminação quando os equipamentos não são recicláveis. O segundo termo diz respeito aos impactos causados pela abertura de uma nova instalação (*land-use*). O terceiro termo é referente aos impactos causados pelo armazenamento de produtos. Finalmente, o quarto termo penaliza a função objetivo pela não recolha de produtos que tenham sido colocados nos locais de recolha.

$$\text{Min } F_e = \sum_{mijtv} p_{ij} X_{mijtv} + \sum_i p_i Y_i + \sum_{mitv} p_i^s S_{mitv} + \sum_{mit} p_i^u U_{mit} \quad [2]$$

O modelo contempla as seguintes restrições: (1) garante o balanço de material em cada centro de recepção e nas UTVs; os centros de recepção têm duas atividades principais: separar os produtos recolhidos nos cinco fluxos

operacionais definidos e armazená-los para ganhar economias de escala; esta restrição relaciona os produtos que chegam dos locais de recolha e os que são enviados para as UTVs com os equipamentos armazenados; (2) o total dos equipamentos existentes em cada local de recolha ou é enviado para os centros de recepção ou é contabilizado como não recolhido e consequentemente penalizado na função objetivo; (3) garante o cumprimento da meta legal; (4) capacidades máximas e mínimas de processamento e armazenamento nos centros de recepção e nas UTVs; (5) capacidades máximas e mínimas no fluxo entre os centros de recepção e as UTVs. Para um maior detalhe sobre as opções de modelação sugere-se a consulta do artigo Gomes et al. (2011).

3.3 Metodologia multi-objetivo

Num problema de programação linear inteira mista com apenas um objetivo, que não seja impossível ou ilimitado, garante-se a existência de solução ótima, mesmo que computacionalmente possa ser difícil determiná-la ou provar que se trata da solução ótima. Quando existe mais do que um objetivo, a questão coloca-se logo no que se entende por “ótimo” dado que os objetivos podem ser conflituosos entre si. Isto é, quando uma solução é a melhor, para um dos objetivos, pode ser “muito pouco boa” para o outro (no caso de termos dois objetivos). Neste contexto, em vez do conceito de “solução ótima” recorre-se o conceito de “solução eficiente”. Informalmente, diz-se que uma solução é eficiente (ou não dominada) quando não é possível melhorar o seu valor num dos objetivos sem o piorar em pelo menos um dos outros. À projeção das soluções eficientes no espaço dos objetivos dá-se o nome de frente de Pareto.

De acordo com Clímaco et al. (2003) existem diversas técnicas para determinar o conjunto de soluções eficientes. Destaquemos três: (i) otimização de uma das funções objetivo transformando as outras em restrições (também conhecido como método das restrições ou ε -*constraint*), (ii) otimização da soma ponderada das funções objetivo e (iii) minimização da distância L_∞ a um ponto de referência. Todos estes métodos apresentam vantagens e inconvenientes. A título de exemplo refira-se que, no método dos pesos, a

escala de valores em que variam as funções objetivo pode ter uma influência determinante nas soluções obtidas, sendo por isso necessário reescalar as funções. Por outro lado, diversos conjuntos de pesos podem conduzir à mesma solução ótima, o que pode tornar pouco eficiente a geração da frente de Pareto. Estas desvantagens são ultrapassadas pelo método das restrições. No entanto, este método pode determinar soluções não eficientes quando alguma das funções objetivo tem soluções ótimas alternativas (Mavrotas, 2009). Para mais detalhes sobre os métodos de otimização multi-objetivo para problemas combinatórios sugere-se a leitura de Ehrgott e Gandibleux (2003).

Neste trabalho, e devido à sua facilidade de implementação, optou-se pelo método das restrições em detrimento de outros. A implementação foi efetuada em duas etapas. Primeiramente, os pontos extremos da frente de Pareto foram obtidos considerando a minimização independente de cada uma das funções objetivo. De seguida, otimizou-se uma das funções, tornando a outra numa restrição de menor ou igual, com o termo independente fixado num valor adequado (ϵ). Este valor ϵ foi sendo alterado de modo a permitir calcular diferentes pontos da curva entre os dois pontos extremos inicialmente obtidos. Alerta-se, no entanto, para o facto de não se ter investigado a existência de soluções ótimas alternativas, pelo que não podemos garantir que as soluções obtidas sejam, efetivamente, eficientes. Nesse sentido, sempre que nos referirmos à frente de Pareto, referiremos que se trata de uma aproximação.

4. O caso de estudo

O modelo anteriormente apresentado baseia-se num modelo de localização discreto pelo que se assumiram, como possíveis localizações para os centros de receção, as 278 sedes dos concelhos de Portugal continental. Dada a impossibilidade de considerar no modelo as localizações reais dos locais de recolha, estes foram agrupados por concelho pelo que totalizam também 278 localizações. Foram consideradas as oito UTVs existentes associando-se a sua localização aos concelhos onde estão sediadas, nomeadamente, Tondela, Setúbal, Loures, Nelas, Seixal, Alenquer, Avis e Vila Nova de Gaia.

Relativamente à quantidade a recolher pela Amb3E esta foi estimada considerando-se o volume anual a recolher de 4 kg/habitante (nº 10, artigo 9º

do Decreto-Lei nº 230/2004) tomando por base o número de habitantes de cada concelho. Este facto permitiu modelar de forma mais realista as necessidades de recolha das grandes áreas urbanas em relação às zonas rurais, por exemplo. Considera-se ainda um crescimento de 3% na quantidade a recolher ao longo do tempo, acompanhando a tendência de geração crescente de REEE que se verifica um pouco por todo o mundo (Gomes et al., 2011).

Para o cumprimento da legislação vigente, pelo menos 80% dos produtos recolhidos terão de ser reciclados ou valorizados. Os restantes 20% podem ser reciclados/valorizados ou enviados para eliminação, o que neste caso pode significar o envio para aterro sanitário ou para incineração.

Em termos de planeamento, o horizonte temporal de cinco anos foi dividido em cinco períodos de um ano (unidade macro) e estes em semestres (unidades micro).

Para modelar os produtos que fluem na rede assumiu-se que os equipamentos recolhidos pelos centros de recepção são distintos dos equipamentos enviados por estes para tratamento e valorização. Assim os primeiros serão denominados por *produtos sem triagem* sendo os segundos denominados de acordo com a classificação atribuída pela Amb3E (fluxos A a E, conforme indicado na Tabela 1).

Em termos da capacidade da rede foram definidos alguns limites: sobre os fluxos, o processamento e o inventário. Não existem limites nos fluxos entre locais de recolha e centros de recepção, já que estes estão fora do controlo da Amb3E, mas existem todavia entre centros de recepção e unidades de tratamento e valorização. Estas últimas entidades têm também limites de processamento e de inventário, em toneladas (Tabela 2).

Tabela 2: Limites de capacidade da rede de recolha

		Mínimo	Máximo
Fluxo entre CR e UTV		0	30 000
UTV	Processamento	0	-
	Inventário	0	30 000
CR	Processamento e Inventário	70	30 000

No que se refere aos custos, estes foram divididos em 6 tipos distintos, tendo alguns dos valores sido fornecidos pela Amb3E e outros estimados de acordo com indicações recebidas da associação. Para garantir a confidencialidade da informação, os valores que seguidamente se apresentam foram alterados, mantendo-se no entanto a coerência com o problema real.

- Custos de transporte ($c_{mijtv}: (m, i, j) \in F_1 \cup F_2$): transporte dos equipamentos em fim de vida entre as diferentes entidades, isto é, entre os locais de recolha e os centros de receção, e destes para unidades de tratamento e valorização. A Amb3E apenas comporta os custos de transporte para as UTVs (1 €/km) não sendo o transporte para os centros de receção da sua responsabilidade. No entanto, a associação pretende ter uma noção do impacto que estes têm na rede pelo que foi assumido um valor idêntico ao anterior, 1 €/km.
- Custos de armazenamento (c_{mitv}^s): este custo modela a existência de equipamentos numa instalação entre duas unidades de tempo micro, ou seja, equipamentos que permaneçam na instalação por um período superior a seis meses. O custo unitário foi estimado em 200 €/t para os centros de receção e em 500 €/t para as UTVs.
- Custos de processamento ($c_{mijtv}: (m, i, j) \in F_p$): montante pago às unidades de tratamento e valorização pelo processamento de uma tonelada de material. Estes custos são dependentes não só da quantidade, mas também da categoria a que pertence o material a tratar conforme Tabela 3.

Tabela 3: Custos de processamento por categoria

	A	B	C	D	E
Custo (€/t)	218	396	272	510	900

- Taxa de compensação (c_i^c): montante pago a cada centro de receção por tonelada de equipamentos em fim de vida processada e enviada para as UTVs. Este valor recompensa os

centros de recepção pelo trabalho de triagem e armazenamento que realizam e tem o valor unitário de 26.5 €/t.

- Custo de abertura de centro de recepção (f_i): custo fixo que ocorre aquando da abertura de um centro cujo valor médio é de 15 000 €.
- Custo de penalização (c_{mit}^u): ocorre se e quando uma tonelada de REEE não é recolhida nos locais de recolha. A Amb3E não incorre realmente neste custo, mas este reflete não só o custo social de deixar por recolher equipamentos depositados nos locais de recolha, mas também a taxa que tem de ser paga à EU se as metas legais não forem cumpridas. O seu valor foi estimado em 1 000 €/t.
- Custo de eliminação (c_{mitv} : $(m, i, j) \in F_d$): custo de enviar uma tonelada de REEE para aterro ou incineração. Este custo aplica-se quando os produtos são enviados para eliminação pelas UTVs e reflete o custo ambiental de recorrer à eliminação dos produtos, em vez de recuperar o material que neles esteja contido. Este valor foi estimado em 50 €/t.

Relativamente aos diversos impactos ambientais envolvidos e modelados, os valores apresentados foram obtidos através do *software* SimaPro 7.1 (PRé Consultants, 2008). Escolheu-se este *software* pois faz uma ponderação dos diferentes impactos segundo um sistema de pontos, o que permite a sua análise e comparação sistemática e consistente. Como principais tipos de impactos ambientais na rede de recolha da Amb3E têm-se:

- Impacto da abertura de instalações (p_i): este valor reflete o impacto resultante da abertura de instalações em termos da utilização de espaço, edifícios e instalações (máquinas, cabos, etc.), bem como as respetivas atividades de fim de vida inerentes às instalações. Este impacto foi estimado tanto para os centros de recepção como para as UTVs, considerando que cada instalação comporta um impacto ambiental ajustado ao horizonte temporal de 5 anos assumido neste estudo. Os valores estimados são 8 880 pontos (pts) para os centros de recepção e 72 600 pts para as UTVs.

- Impacto do transporte ($p_{ij}: (i, j) \in F_1 \cup F_2$): valor associado aos impactos gerados pelas atividades de transporte deste sistema, que é função dos quilómetros percorridos e da quantidade a transportar (em toneladas). Este parâmetro integra o consumo de combustível, a emissão de gases para a atmosfera e a emissão de metais pesados para o solo e para as águas, tendo sido estimado em 0.0464 pts/(t*km).
- Impacto do processamento ($p_{ij}: (i, j) \in F_p$): impacto imputado às UTVs por cada tonelada de material que estas processem, refletindo o impacto causado pela operação das UTVs em termos de consumo energético e de emissões atmosféricas, estimando-se o seu valor de 3.31 pts/t.
- Impacto da manutenção de inventário (p_i^s): valor do impacto ambiental correspondente à utilização do espaço e às emissões atmosféricas geradas pelos produtos mantidos em inventário. Para a manutenção de inventário em centros de recepção ou UTV correspondem os valores de 1.8 pts/t e 2 pts/t, respetivamente.
- Impacto da eliminação ($p_{ij}: (i, j) \in F_d$): impacto associado à eliminação dos produtos que não são recuperáveis. Esta eliminação pode ser feita de várias formas, por exemplo, através do envio dos produtos para aterro ou para incineração. Esta operação nem sempre é nefasta para o ambiente, já que a incineração de produtos gera energia. Considerou-se assim que 60% dos equipamentos a eliminar seriam enviados para aterro sanitário, enquanto a eliminação dos restantes 40% seria feita por incineração. Os impactos inerentes a cada um destes processos foram ajustados ao horizonte temporal considerado e à capacidade dos aterros e dos incineradores escolhidos da base de dados do *software* SimaPro. Estes foram combinados – na razão 60/40 descrita acima – de modo a definir um único impacto de eliminação, dado por tonelada de produto eliminado. O valor final estimado foi de 7.44 pts/t.

- Impacto de penalização pela não recolha dos equipamentos (p_i^u): para o cálculo deste valor considerou-se novamente que 60% dos produtos não recolhidos seriam enviados para aterro sanitário juntamente com os resíduos sólidos urbanos e os restantes 40% permaneceriam a céu aberto. O *software* SimaPro não dispõe de informação que permita aferir o valor relativo à permanência a céu aberto, pelo que se considerou que este deveria ser notavelmente superior ao do envio para aterro, tendo-se estimado o valor final para este impacto em 1 607.38 pts/t.

5. Análise de resultados

Esta análise de resultados será efetuada em três partes. A primeira analisará a rede de custo mínimo, seguindo-se a análise da rede de impacto mínimo, com a apresentação de uma pequena comparação entre as duas. Finalmente apresentar-se-á a análise multi-objetivo que, devido a dificuldades computacionais, incidirá apenas sobre os concelhos de Lisboa e Vale do Tejo.

5.1 Rede de custo mínimo

A rede de custo mínimo (Figura 7) é formada por 20 centros de receção que recebem a totalidade dos equipamentos disponíveis nos locais de recolha. Como seria expectável, a abertura de um centro de receção ocorre em cada um dos sete concelhos onde se localizam as unidades de tratamento e valorização que maior volume processam. Os restantes 13 centros ficam dispersos de forma mais ou menos uniforme pelo país. Na Figura 7 apresentam-se as ligações entre os centros de receção e as unidades que processam os quatro fluxos (A, B, C, e D). O fluxo E não está representado na figura dado ser totalmente enviado para a unidade que lhe está dedicada (em Setúbal). Assim, havendo apenas uma unidade de tratamento e valorização para onde são enviados os equipamentos do fluxo E, todos os centros de receção são afetos a esta unidade.

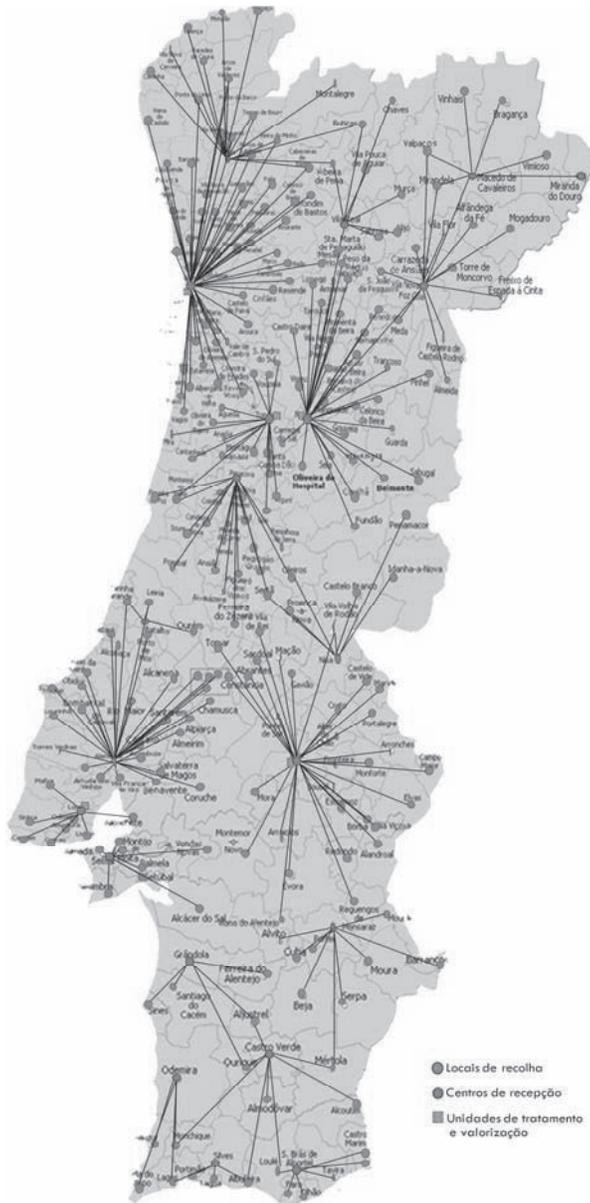


Figura 7: Localização dos centros de receção e afetação dos locais de recolha – minimização de custos

Os volumes reciclados pelas unidades de tratamento e valorização são apresentados na Figura 8. Podemos observar que a UTV com maior volume reciclado é a que opera em Vila Nova de Gaia, seguindo-se a localizada em

Loures. Esta situação é explicada pela proximidade dos grandes centros habitacionais do Porto e de Lisboa, respetivamente.

O reduzido peso das lâmpadas (fluxo E) encontra-se bem evidenciado na comparação entre os volumes processados pela unidade de Setúbal e pelas restantes unidades. É novamente o peso que torna o fluxo A (grandes equipamentos) o mais representativo na figura em análise. Relativamente ao volume que estas unidades enviam para eliminação (não mostrado na figura) este representa 20% do volume total recebido nas mesmas. Ou seja, apenas é reciclada a percentagem mínima exigida por lei.

Esta situação realça o facto deste sistema ser imposto por uma medida legal e não por uma oportunidade de negócio percebida pelos produtores de equipamentos elétricos e eletrónicos.

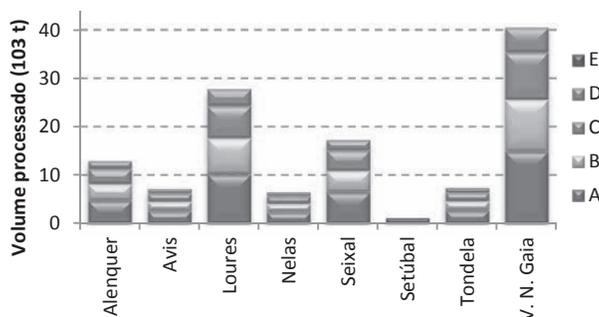


Figura 8: Volumes de equipamentos reciclados nas UTVs – minimização de custos

No que se refere à política de armazenamento podemos observar na Figura 9 que existe um elevado volume de produtos armazenados nos centros de recepção no fim do horizonte temporal, não se tendo registado qualquer armazenamento até ao ano 4. O armazenamento de lâmpadas (fluxo E) inicia-se no primeiro semestre do penúltimo ano do horizonte temporal. Esta diferença de comportamento é justificada pelo baixo peso destes equipamentos.

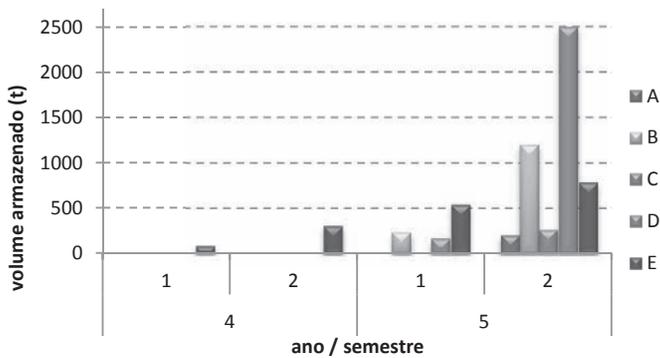


Figura 9: Volume total de equipamentos armazenados nos CRs – minimização de custos

O custo total desta rede é cerca de 55 410 mil euros. Os custos de processamento representam aproximadamente 70% do custo total, seguindo-se os custos de transporte que totalizam 20%. O custo de abertura dos centros representa apenas 1% do custo total (Figura 10).

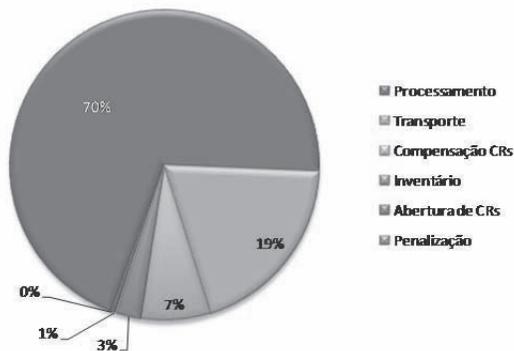


Figura 10: Estrutura de custos da rede de custo mínimo

5.2 Rede de impacto mínimo

A rede de impacto mínimo é formada por 15 centros de recepção, menos 5 que no cenário de custos (Figura 11).



Figura 11: Localização dos centros de receção e afetação dos locais de recolha – minimização de impactos

Realce-se que em duas das localizações onde estão instaladas unidades de tratamento e valorização não foram abertos centros de recepção. Este facto pode ser justificado pela proximidade geográfica das duas instalações e pela redução em 25% do número de centros de recepção relativamente ao cenário anterior.

Quando comparada com a rede de custo mínimo observa-se que, na de impacto mínimo, a afetação dos locais de recolha aos centros de recepção provoca um efeito mais estrelar. Isto é, os centros de recepção são abertos em concelhos cuja posição geográfica se aproxima do centro geográfico da área formada pelos concelhos que lhe estão afetos.

Em termos de volumes processados, estes são superiores aos verificados no cenário anterior (143 922 t vs. 120 019 t). Este aumento de processamento é justificado pela diminuição das quantidades enviadas para eliminação, que neste segundo cenário não ultrapassaram os 5%. Este aspeto mostra as vantagens ambientais da recuperação dos equipamentos por oposição à deposição em aterro.

Na Figura 12 mostram-se os volumes totais processados por cada uma das UTV, por fluxo de equipamentos. Repare-se que a unidade instalada em Vila Nova de Gaia mantém-se como sendo a instalação que processa mais equipamentos (cerca de 35% do volume total) seguindo-se a unidade instalada em Loures (cerca de 23%).

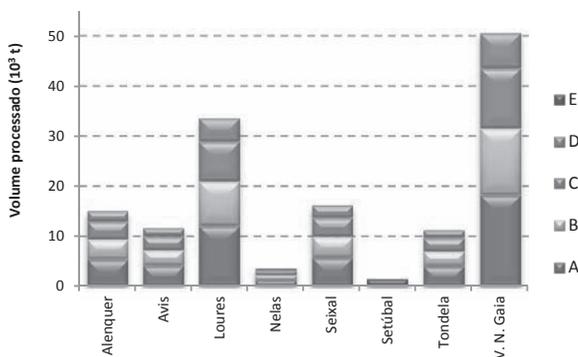


Figura 12: Volume total processado nas UTVs – minimização de impactos

No entanto, comparando os volumes processados em cada uma das unidades nos dois cenários verifica-se que as unidades de Avis e de Tondela têm um aumento de processamento acima dos 50%. Por contraponto, a unidade localizada em Nelas vê o volume de equipamentos que recebe reduzido em cerca de 50%. A unidade instalada no Seixal também vê o seu volume de processamento decrescer mas apenas em 6%.

O armazenamento dos produtos nos centros de recepção (Figura 13) segue um padrão idêntico ao do cenário anterior. Apesar de originado pela limitação necessária no horizonte temporal, este processo de armazenamento tem início logo no segundo semestre do primeiro ano (note-se que, dado o valor armazenado no dois primeiros anos ser inferior a 100 t, a correspondente coluna na Figura 13 é de muito reduzida dimensão não se conseguindo visualizar adequadamente). Novamente são as lâmpadas (fluxo E) que mais cedo começam a ser armazenadas. Outro aspeto distinto é o facto do principal fluxo armazenado ser o dos grandes equipamentos (fluxo A) e não o de aparelhos de televisão e monitores observado no cenário anterior (fluxo D).

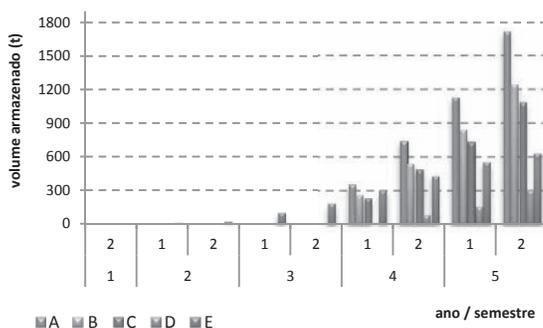


Figura 13: Volume total de equipamentos armazenados nos CRs – minimização de impactos

A estrutura de impactos apresentada na Figura 14 mostra que é o impacto provocado pela abertura das UTVs que tem maior contribuição para o impacto total do sistema (35%). Seguem-se o processamento e o transporte com 28% e 25%, respetivamente.

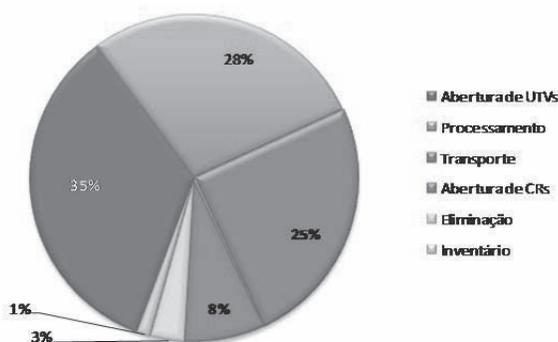


Figura 14: Estrutura de impactos da rede de impacto mínimo

Um dos aspetos que seria muito importante analisar relaciona-se com o fluxo de saída das unidades de tratamento e valorização. Contudo, estas unidades não são da responsabilidade da Amb3E mas sim dos seus parceiros, pelo que a associação não dispõe de informação relativa a este fluxo.

Na Tabela 4 mostram-se os custos e os impactos ambientais obtidos nos dois cenários. De realçar o facto de que uma redução de 7% no impacto ambiental da rede corresponde um aumento de 14% no custo total. Este aumento é causado principalmente pelo aumento do custo dos transportes, consequência da redução do número de centros de recepção.

Tabela 4: Custos e impactos totais da rede de recolha da Amb3E

	Custo (€)	Impacto ambiental (pts)	Nº de CR
Min. de custo	55 410 628	1 828 030	20
Min. do imp. ambiental	63 569 548	1 688 834	15

Para obtenção dos resultados apresentados recorreu-se ao *software* GAMS conjuntamente com o *solver* CPLEX num computador Pentium 1.86 GHz. As estatísticas computacionais dos dois cenários anteriormente analisados encontram-se expressas na Tabela 5. O modelo de impacto ambiental é de bastante mais difícil resolução que o de custo, não se tendo conseguido provar, ao fim de 11 horas de computação, que o ótimo havia sido atingido. Este facto é todavia difícil de explicar mas tudo leva a crer que este aumento

de dificuldade se prende com a alteração do valor dos parâmetros envolvidos na função objetivo deste último problema. Este aspeto carece de uma maior investigação, a qual sai fora do âmbito deste trabalho.

Tabela 5: Estatísticas computacionais

	Variáveis		Total de restrições	Iterações	CPU (s)	Gap (%)
	total	binárias				
Min. custo	821 164	278	789 979	297 473	3 992	0.04
Min. impacto				822 880	39 149	2.6

5.3 Comparação com a situação atual

À data da realização deste estudo, a rede contava com centros de recepção nos 278 concelhos de Portugal continental, o que representava um custo total de aproximadamente 58 940 mil euros e um impacto ambiental de 3 972 225 pts.

A solução apresentada no cenário de custo mínimo permite uma redução de cerca de 6% no custo total da rede. Todavia é em termos do impacto ambiental que os resultados se mostram mais interessantes. As reduções obtidas no impacto ambiental da rede são de 54% quando comparada com o valor obtido com a solução de menor custo e de 57% quando comparada com a solução de menor impacto. Esta redução é conseguida principalmente devido à redução do número de centros de recepção. Realce-se, no entanto, que a solução de menor impacto tem um custo total superior em cerca de 8% quando comparado com o custo total da rede atual.

5.4 Análise multi-objetivo dos concelhos de Lisboa e Vale do Tejo

A fim de analisar conjuntamente os dois objetivos considerados, abordou-se o problema utilizando uma metodologia multi-objetivo. Os valores obtidos nas análises anteriores, expressos na Tabela 4, foram tomados como uma aproximação aos dois pontos extremos da frente de Pareto. Para determinar algumas aproximações aos pontos intermédios recorreu-se ao método das restrições. Tomou-se como objetivo a minimizar o económico e limitaram-se

os impactos ambientais com recurso a uma restrição. Os pontos pretendidos foram obtidos fazendo variar o limite imposto de acordo com a restrição [3],

$$F_e \leq \varepsilon * I_{max} \quad [3]$$

sendo $\varepsilon \in [0,1]$ e I_{max} o valor do impacto da rede de menor custo.

O objetivo inicial era a aplicação da metodologia multi-objetivo a Portugal continental. Contudo, dadas as dimensões do modelo, foi computacionalmente impossível fazer este estudo. Assim, optou-se por reduzir a área geográfica, tendo-se analisado os concelhos de Lisboa e Vale do Tejo (LVT) por duas razões principais. A primeira prende-se com o seu elevado número de concelhos (53 dos 278 concelhos de Portugal continental). A segunda por se tratar da área geográfica onde estão localizadas quatro das oito unidades de tratamento e valorização (nomeadamente, nos concelhos de Alenquer, Loures, Seixal e Setúbal).

Na Tabela 6 apresentam-se os valores relativos ao custo e ao impacto das aproximações aos pontos extremos da frente de Pareto relativos a LVT. Note-se que a minimização da função ambiental conduziu a um valor que é apenas 10% inferior ao impacto ambiental da rede de custo mínimo. A esta redução está associado um aumento de 13% no custo total da rede logística.

Tabela 6: Custos e impactos da aproximação dos pontos extremos da frente de Pareto para Lisboa e Vale do Tejo

	Custo (€)	Impacto ambiental (pts)	Nº de CR
Opt. custo	19 533 728	669 042	6
Opt. impacto	22 190 000	608 362	4

A Figura 15 mostra uma aproximação à frente de Pareto. Para a obtenção destes pontos, fez-se variar o valor do parâmetro ε entre 0.9 e 1, com incrementos de 0.02. Note-se que a sua forma de exponencial negativa sugere que os benefícios em termos de impactos ambientais geram um incremento menor nos custos totais perto da solução de menor custo. À medida que a solução se aproxima do impacto ambiental de menor valor, melhorias quase

marginais ao nível dos impactos exigem investimentos financeiros consideráveis.

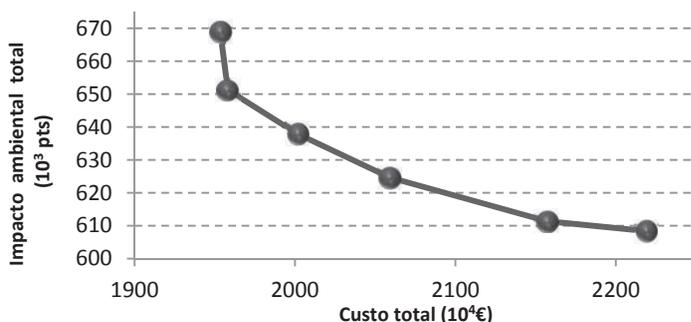


Figura 15: Aproximação da frente de Pareto para a região de Lisboa e Vale do Tejo

Analisando os impactos ambientais nas três vertentes que compõem o *Eco-Indicator 99* podemos observar que é no consumo dos recursos naturais que esta rede tem um maior impacto (Figura 16). As atividades da rede que mais influenciam o ambiente são a abertura das instalações, as atividades de processamento e as de transporte, todas elas, atividades “consumidoras” de recursos naturais. Segue-se o impacto na saúde humana e, por fim, a qualidade do ecossistema.

Foi utilizado um modelo linear inteiro misto, tendo todas as instâncias corridas para determinar esta aproximação da frente de Pareto mais de 100 mil variáveis, das quais 53 são binárias, e um total de 98 500 restrições. Todas correram em menos de uma hora com *gaps* entre 0.01% e 1.37%, tendo-se obtido um *gap* médio de 0.53%.

6. Conclusões

Neste trabalho apresentou-se o caso de estudo que envolve o estabelecimento da rede logística de recolha de equipamentos elétricos e eletrónicos da Amb3E. O objetivo foi o re-projecto da rede tendo em atenção métricas económicas e ambientais. Um modelo linear inteiro misto foi utilizado tendo revelado que uma redução de custos ou de impactos ambientais passará pela redução no número de centros de receção em operação. A análise económica da rede propõe que se recicle apenas o mínimo permitido por lei,

sendo os restantes equipamentos enviados para aterro. Já o objetivo ambiental mostrou que os equipamentos deverão ser reciclados uma vez que produzem menos impacto que quando enviados para aterro.

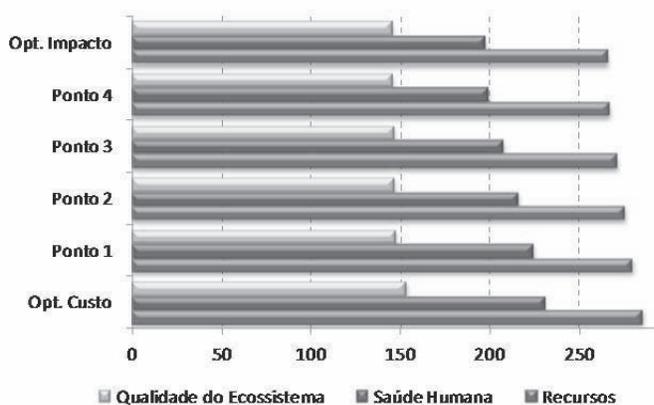


Figura 16: Valores por categoria de impacto segundo o indicador *Eco-Indicator 99* (em 10^3 pts)

Um estudo multi-objetivo efetuado para os municípios de Lisboa e Vale do Tejo mostrou que se pode melhorar a qualidade ambiental da rede desta região com um pequeno acréscimo no custo total da mesma. Contudo, para se atingirem os níveis ambientais ótimos, existe um aumento significativo nos custos totais.

Como trabalho futuro, seria muito interessante não só contemplar o fluxo de saída das unidades de tratamento e valorização, como também estender este estudo considerando todo o ciclo de vida dos equipamentos, desde a produção à sua valorização em fim-de-vida. Relativamente às análises apresentadas, pretende-se aprofundar o estudo multi-objetivo considerando todo o país ou, pelo menos, a maior extensão possível. No que se refere ao método usado para a determinação da frente de Pareto, estamos a implementar melhorias na qualidade das soluções apresentadas.

Finalmente importa salientar a excelente colaboração que existiu entre a equipa de investigação e a Amb3E no desenvolvimento do trabalho descrito. Os resultados obtidos permitiram analisar aspetos não ainda considerados

previamente pela empresa, possibilitando à mesma obter informações de como pode a rede responder às necessidades e como pode ainda equilibrar objetivos económicos e ambientais. Este trabalho necessita todavia de mais investimento no desenvolvimento de uma ferramenta que possa ser utilizada pela empresa. Este investimento deve abarcar os aspetos acima referidos e o estudo de métodos de resolução do modelo bem como o desenvolvimento de uma interface informática.

Agradecimentos

Este trabalho foi parcialmente suportado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia no âmbito do projeto PTDC/SEN-ENR/102869/2008 e pelo CMA/FCT/UNL, no âmbito do projeto PEstOE/MAT/UI0297/2011.

Agradece-se ainda a colaboração do Pedro Furtado que no âmbito da sua tese de mestrado em Engenharia e Gestão Industrial no IST contribuiu para algum do trabalho reportado neste estudo.

REFERÊNCIAS

AMB3E (2009). Relatório de Contas 2008, Amb3E – Associação Portuguesa de Gestão de Resíduos de Equipamentos Eléctricos e Electrónicos.

ALUMUR, S. A., NICKEL, S., SALDANHA-DA-GAMA, F., and VERTER, V. (2012). Multi-period reverse logistics network design. *European Journal of Operational Research*, 220(1), 67–78.

CHANG, X., HUO, J., and CHEN, S. (2006). Study on integrated logistics network model and network design for waste electrical and electronic equipment. *SOLI'06. IEEE International Conference on Service Operations and Logistics, and Informatics*, 654–658.

CLÍMACO, J. N., ANTUNES, C. H., and ALVES, M. J. G. (2003). Programação Linear Multiobjectivo, Imprensa da Universidade de Coimbra.

DUQUE, J., BARBOSA-PÓVOA A. P. F. D., and NOVAIS, A. Q. (2009). Effect of life cycle impact assessment on the design and scheduling of a recovery network for industrial polluted waste. *Computer Aided Chemical Engineering*, 26, 1117-1182.

EHRGOTT, M., and GANDIBLEUX, X. (2003). Multiobjective Combinatorial Optimization - theory, methodology, and applications. In Multiple Criteria Optimization: State of the Art Annotated Bibliographic Survey, M. Ehrgott and X. Gandibleux (Eds.) Kluwer's International Series in Operations Research and Management Science, 52, 369-444.

FLAPPER, S. D. P., VAN NUNEN J., and VAN WASSENHOVE, L. N. (2005). Managing Closed-Loop Supply Chains. Springer-Verlag.

GOMES, M. I., BARBOSA-POVOA, A. P., and NOVAIS, A. Q. (2011). Modelling a recovery network for WEEE: a case study in Portugal. *Waste Management (New York, N.Y.)*, 31(7), 1645–1660.

- GRUNOW, M., and GOBBI, C. (2009). Designing the reverse network for WEEE in Denmark. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 58(1), 391–394.
- KANNAN, D., DIABAT, A., ALREFAEI, M., GOVINDAN, K., and YONG, G. (2012). A carbon footprint based reverse logistics network design model. *Resources, Conservation and Recycling*, 67, 75–79.
- KRIKKE, H. R., VAN HARTEN, A., and SCHUUR, P. C. (1999). Business case Océ: reverse logistic network re-design for copiers. *OR Spektrum*, 21, 381–409.
- LIECKENS, K., and VANDAELE, N. (2007). Reverse logistics network design with stochastic lead times. *Computers and Operations Research*, 34(2), 395–416.
- MATOS, S., and HALL, J. (2007). Integrating sustainable development in the supply chain: The case of life cycle assessment in oil and gas and agricultural biotechnology. *Journal of Operations Management*, 25(6), 1083–1102.
- MAVROTAS, G. (2009). Effective implementation of the ϵ -constraint method in Multi-Objective Mathematical Programming problems. *Applied Mathematics and Computation*, 213(2), 455–465.
- NIKOLOPOULOU, A., and IERAPETRITOU, M. G. (2012). Optimal design of sustainable chemical processes and supply chains: A review. *Computers and Chemical Engineering*, 44, 94–103.
- PRÉ CONSULTANTS (2008), “Introduction to LCA with SimaPro 7”. <http://www.pre-sustainability.com/download/manuals/SimaPro7IntroductionToLCA.pdf> (accedido em novembro de 2012)
- QUARIGUASI FROTA NETO, J., WALTHER, G., BLOEMHOF, J., VAN NUNEN, J. A. E. E., and SPENGLER, T. (2009). A methodology for assessing eco-efficiency in logistics networks. *European Journal of Operational Research*, 193(3), 670–682.
- QUEIRUGA, D., WALTHER, G., GONZÁLEZ-BENITO, J., and SPENGLER, T. (2008). Evaluation of sites for the location of WEEE recycling plants in Spain. *Waste Management (New York, N.Y.)*, 28(1), 181–190.
- ROGERS, D. S., MELAMED, B., and LEMBKE, R. S. (2012). Modeling and analysis of reverse Logistics. *Journal of Business Logistics*, 33(2), 107–117.
- SHARMA, M., AMMONS, J. C., and HARTMAN, J. C. (2007). Asset management with reverse product flows and environmental considerations. *Computers and Operations Research*, 34(2), 464–486.
- SHERIFF, K. M. M., GUNASEKARAN, A., and NACHIAPPAN, S. (2012). Reverse logistics network design: a review on strategic perspective. *International Journal of Logistics Systems and Management*, 12(2), 171.
- TURKAY, M., ORUC, C., FUJITA, K., and ASAKURA, T. (2004). Multi-company collaborative supply chain management with economical and environmental considerations. *Computers and Chemical Engineering*, 28, 985-992.
- WALTHER, G., and SPENGLER, T. (2005). Impact of WEEE-directive on reverse logistics in Germany. *International Journal of Physical Distribution and Logistics Management*, 35(5), 337–361.